

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ПОЛОЦКОЙ ГЭС

Кандидаты техн. наук, доценты КРУГЛОВ Г. Г., КУНЦЕВИЧ Н. М., ЛИНКЕВИЧ Н. Н.,
студ. ЕВДОКИМОВ В. А.

Белорусский национальный технический университет

В последние десятилетия во многих странах мира повысился интерес к освоению возобновляемых энергоресурсов. Это обусловлено непрерывно растущими затратами на добычу органического топлива и сокращением его запасов.

Республика Беларусь испытывает финансовые трудности при расчете за импортируемые топливно-энергетические ресурсы. Для снижения расхода органического топлива на производство электрической энергии существует несколько путей. Один из них – развитие гидроэнергетики путем строительства гидроэлектростанций (ГЭС) малой и средней мощности.

В республике накоплен положительный опыт восстановления ранее построенных и строительства новых малых ГЭС, что позволяет приступить к созданию каскада ГЭС на реке Западная Двина, где имеются благоприятные условия, например удобные створы, при использовании которых отметки нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилищ не превышают уровня паводковых вод. Один из наиболее благоприятных створов находится в районе Полоцка.

В состав сооружений гидроузла Полоцкой ГЭС входят земляная плотина, бетонная водосливная плотина и здание ГЭС. Во вторую очередь предусмотрено строительство судоходного шлюза.

В связи с тем, что водосбросная плотина должна обеспечить пропуск значительных паводковых расходов (расчетный паводок 3%-й обеспеченности – 3750 м³/с, поверочный 0,5%-й обеспеченности – 5000 м³/с), льда и надежное сопряжение бьефов, потребовались гидравлические исследования на физической модели. Эти исследования были выполнены в гидротехнической лаборатории кафедры гидротехнического и энергетического строительства Белорусского национального технического университета.

Водосливная плотина Полоцкой ГЭС (рис. 1) запроектирована в виде водослива практического профиля, очерченного по координатам Криге-

ра–Офицерова. Ширина водосливного отверстия принята 12,0 м. Из условия пропуска поверочного паводкового расхода 0,5%-й обеспеченности $Q = 5000$ м³/с принято 10 водосливных отверстий. Водосливной фронт делится на водосливные отверстия бычками толщиной 3,0 м. Очертание бычка в плане со стороны верхнего бьефа (ВБ) принято в виде двухгранного угла из условия пропуска льда через водосброс, низовая грань бычка выполняется полукруглой. В бычках устраиваются пазы для размещения в них опорно-ходовых частей ремонтных и рабочих затворов, расстояние между которыми составляет 2,0 м, что позволяет, при необходимости, вести ремонтные работы непосредственно в пролете плотины. Рабочие и ремонтные затворы плотины плоские, в виде шандорных балок высотой 2,0 м. Ширина пазов принята 1,5 м, глубина – 0,7 м. Со стороны нижнего бьефа (НБ) в бычках также предусмотрены пазы шириной 1,0 м и глубиной 0,7 м для установки ремонтных заграждений. Отметка гребня бычка превышает отметку форсированного подпорного уровня (ФПУ) на 1,5 м и составляет 123,5 м.

Напорная грань плотины имеет ломаное очертание с тремя наклонными и вертикальными участками. К консольной фундаментной плите со стороны верхнего бьефа примыкает глиняный понур, дно верхнего бьефа на отметке 106,0 м закреплено железобетонными плитами.

Подошва плотины запроектирована с двумя (верховым и низовым) зубьями, между которыми укладывается дренаж. Фильтрационный поток, поступающий в дренаж под подошвой плотины, по вертикальным скважинам отводится в смотровую галерею и из нее – в нижний бьеф.

В НБ водосливная поверхность сопрягается с дном водобойного колодца на отметке 105,0 м. Глубина водобойного колодца принята 1,0 м, длина – 26,0 м. За водобойным колодцем устраивается рисберма длиной 28,0 м, которая крепится железобетонными плитами. Концевой участок

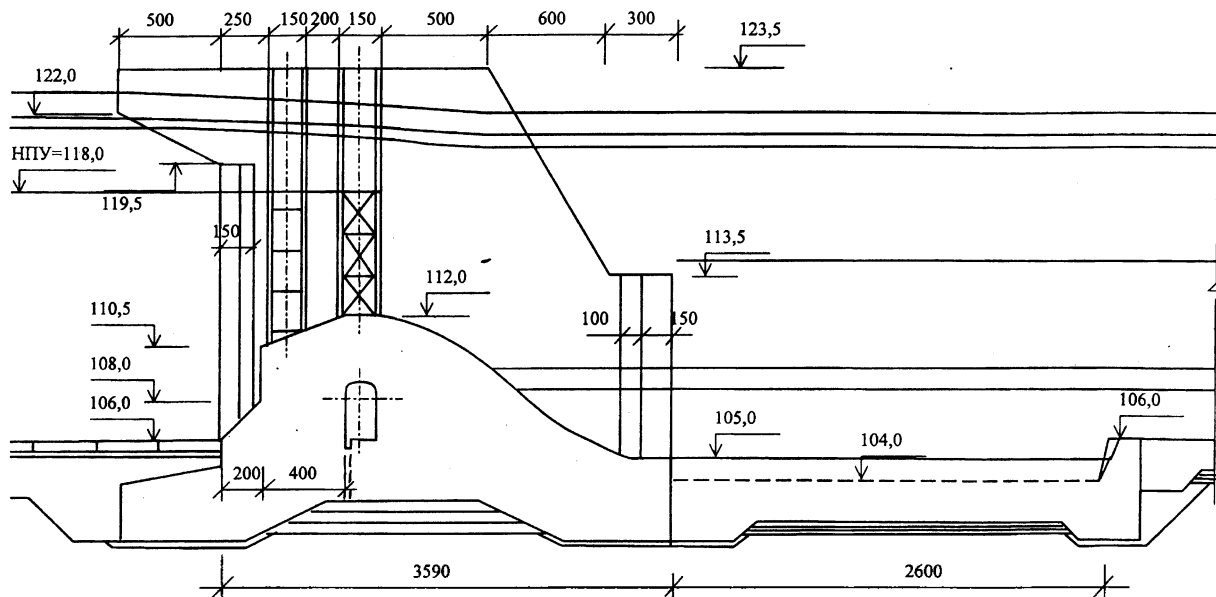


Рис. 1. Водосливная плотина Полоцкой ГЭС

рисбермы, защищающий все крепления от подмыва, выполняется в виде предохранительного ковша и загружается камнем слоем от одного до нескольких метров.

В основе гидравлических исследований паводкового водосброса Полоцкой ГЭС лежит метод физического моделирования [1–6], цель которого – воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемых явлений и обеспечение полного подобия натуральных и модельных явлений.

Гидравлические исследования проводятся для одного водосливного пролета плотины шириной 12,0 м при наличии двух полубычков шириной по 1,5 м каждый. Один пролет водосливной плотины должен пропускать расход, равный $500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Модель одного пролета водосливной плотины была изготовлена в масштабе 1:47 (рис. 2). По вырезанному из картона шаблону тщательно выверялись геометрические размеры модели, выполненной из дерева, кривизна водосливной поверхности и очертания носка. Отдельно изготавливались два полубычка, и все элементы соединились между собой. Все грани плотины и полубычков зачищались наждачной бумагой, шпаклевались и покрывались эмалью.

В собранном виде модель водосливной плотины устанавливалась в гидравлическом зеркальном лотке шириной 32,5 см и длиной 11,0 м. Расстояние от оголовка мерного водослива на

входе в лоток до модели принято около 5,0 м, а до выхода из лотка – около 6,0 м. Таким образом, вход и выход из лотка не оказывали влияния на режимы потока в верхнем и нижнем бьефах модели.

В НБ модели водосливной плотины устраивался водобойный колодец глубиной 2,13 см и длиной 25,63 см. Съёмной доской соответствующих размеров водобойный колодец мог закрываться, образуя сопряжение водосливной поверхности непосредственно с дном отводящего канала. Таким образом моделировалась работа водосливной плотины без водобойного колодца.

Отводящий и подводящий каналы выполнялись в виде пола из деревянных досок на всю ширину лотка.

Все высотные размеры опытной установки выставлялись относительно отметки гребня водослива, который устанавливался по уровню, строго горизонтально.

Очертание водосливной поверхности модели было выполнено по координатам Кригера–Оффенберга.

Для измерения отметок уровней воды на бортах лотка установлены три мерные иглы. Одна – в верхнем бьефе, на расстоянии 200,0 см от напорной грани модели плотины, где не сказывается кривая спада, образующаяся на входе потока в водосливное отверстие и распространяющаяся в сторону ВБ на расстояние 3...5 напоров на гребне водослива, т. е. 60...105,0 см. В нижнем бьефе

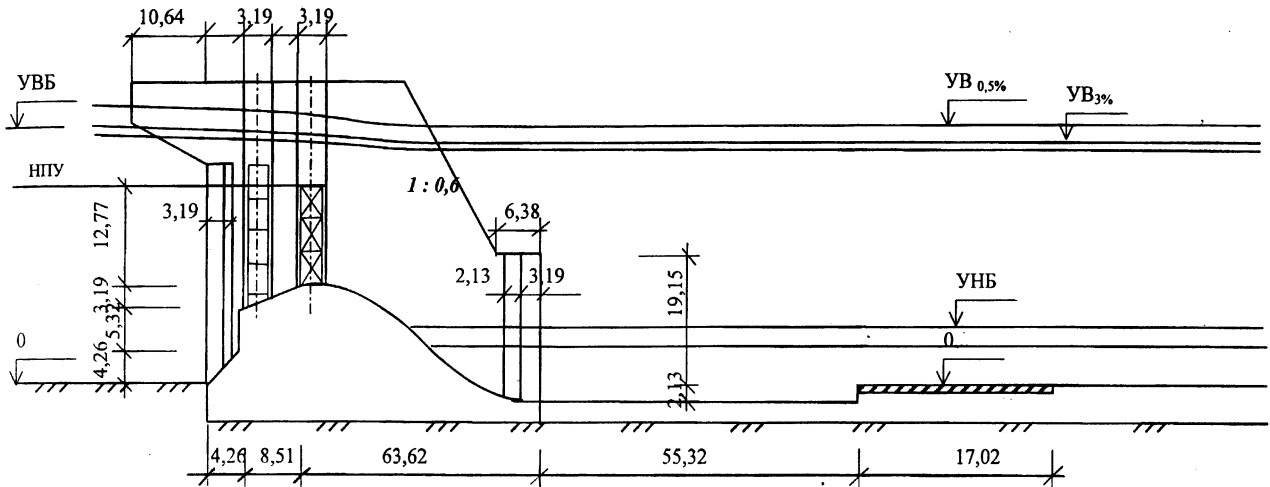


Рис. 2. Схема опытной установки

установлены две мерные иглы на расстоянии 60,0 и 215,0 см от водобойного колодца, что соответствовало концевому участку рисбермы (28,0 м от колодца) и расстоянию 101,0 м от окончания водобойного колодца. Точность измерения отметок уровней воды определялась мерными иглами 0,1 мм.

Скорость течения потока измерялась с помощью тарированных вертушек конструкции ЦНИИКИВР.

Регулирование расходов, поступающих на модель, осуществлялось посредством задвижки на подающем трубопроводе. Из трубопровода вода поступала в оголовок лотка, где установлен треугольный мерный водослив с углом выреза 90°. Уровень воды в верхнем бьефе мерного водослива измерялся при помощи иглы, установленной в пьезометре, выведенном из стенки оголовка лотка. Точность измерения уровня воды в пьезометре определялась мерной иглой 0,1 мм.

Расход, проходящий через треугольный мерный водослив и поступающий на модель, определялся по тарировочной кривой и для контроля вычислялся по зависимости, предложенной для стальных треугольных мерных водосликов:

$$Q = 1,343 H^{2,47},$$

где H — напор на гребне плотины, равный разности отметок уровня воды перед водосливом и его гребнем.

Уровень воды в НБ модели регулировался при помощи жалюзи, установленных в конце лотка.

Для моделирования процесса пропуска льда через водосливную плотину и оценки сил, возникающих при контакте льда с сооружением, необходимо, прежде всего, выдержать геометрическое подобие, уменьшив все размеры в λ раз. Кроме того, материал, заменяющий на модели лед, должен иметь прочность и модуль упругости в λ раз меньше природного льда [4, 7–10]. Однако осуществить моделирование процессов разрушения льда достаточно сложно. Поэтому моделирование пропуска льда через сооружение и особенно возникающих сил взаимодействия может дать лишь качественную картину явления с достаточно грубым приближением к натуре [10].

При выборе материала, заменяющего лед на модели, испытывались парафин, воск, технический жир, нафталин, древесные опилки, пропитанная вата, смеси этих материалов, склеенные деревянные пластинки и пластинки из полимерных материалов, ослабленные ледяные пластины и лед пониженной прочности.

В связи с тем, что в задании моделирование сил, возникающих при контакте льда с сооружением, и процессов разрушения льда не предусматривалось, а ставилась задача качественной оценки процесса пропуска льдин, в опытах использовался искусственно замороженный лед размером в плане 20×20 см и толщиной около 1,6 см, что соответствовало натурным размерам льдин 10×10 м и толщине льда 75,0 см.

В результате исследований были выполнены следующие опыты:

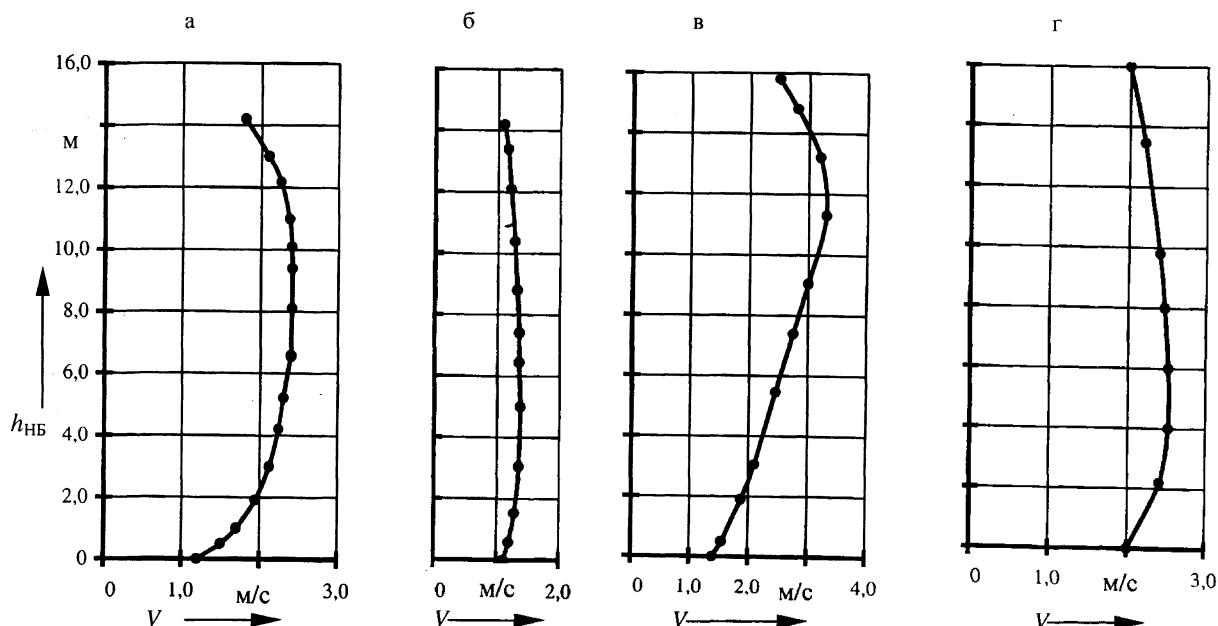


Рис. 3. Эпюры скоростей потока в нижнем бьефе по оси пролета при пропуске расхода обеспеченности: а, б – 3% и в, г – 0,5% (на расстоянии 28,0 м (а, в) и 101,0 м (б, г) от водобойного колодца)

1. Проверка пропуска расчетного паводкового расхода 3%-й обеспеченности. Исследования показали, что расчетный расход $375,0 \text{ м}^3/\text{с}$, которому на модели соответствует расход в $24,76 \text{ л/с}$, проходит при отметке воды в верхнем бьефе $33,87 \text{ см}$, которой в натурных условиях соответствует отметка ВБ $120,8 \text{ м}$. Глубина воды в верхнем бьефе – $14,8 \text{ м}$, в нижнем – $14,3 \text{ м}$. Таким образом, перепад между уровнями ВБ и НБ $\Delta z = 0,5 \text{ м}$.

Поток на водосливе и в нижнем бьефе достаточно спокойный, сбойности не наблюдается. От боковых поверхностей двухгранных бычков и пазов на поверхности потока образуются косые волны, сходящиеся на оси пролета.

Максимальные скорости в конце рисбермы (на расстоянии $28,0 \text{ м}$ от водобойного колодца) не превышают $2,5 \text{ м/с}$, а на расстоянии $101,0 \text{ м}$ – уменьшаются до $1,4 \text{ м/с}$. Эпюры скоростей на оси потока приведены на рис. 3а.

Лед при таких уровнях воды в бьефах проходит свободно, не задевая водосливную поверхность плотины и не задерживаясь в нижнем бьефе, в зоне водобойного колодца и рисбермы.

2. Проверка пропуска поверочного паводкового расхода 0,5%-й обеспеченности. Исследованиями установлено, что расчетный расход модели $33,06 \text{ л/с}$ проходит при отметке воды в ВБ $34,22 \text{ см}$, которой в натурных условиях соответствует отметка верхнего бьефа $122,4 \text{ м}$. Глу-

бина воды в верхнем бьефе – $16,4 \text{ м}$, в нижнем – $15,8 \text{ м}$. Таким образом, отметка максимального уровня воды в верхнем бьефе ФПУ равна $122,4 \text{ м}$, перепад между уровнями ВБ и НБ $\Delta z = 0,6 \text{ м}$.

Так же, как и при пропуске 3 % расхода обеспеченности, на поверхности потока образуются косые волны, отходящие от боковых поверхностей бычков и сходящиеся на оси потока.

Максимальные скорости в конце рисбермы достигают $3,2 \text{ м/с}$, а на расстоянии $101,0 \text{ м}$ от водобойного колодца уменьшаются до $2,5 \text{ м/с}$. Эпюры скоростей на оси потока приведены на рис. 3б.

Лед при этом режиме также проходит свободно, не задевая водосливную поверхность плотины и не задерживаясь в зоне водобойного колодца.

Результаты проверки пропускной способности водосливной плотины Полоцкой ГЭС сведены в табл. 1.

3. Проверка пропускной способности и сопряжения бьефов при переливе потока через шандорное ограждение. Исследования показали, что при отметке НПУ = $118,0 \text{ м}$ и переливе потока через шандорное ограждение высотой $4,0 \text{ м}$, установленное на гребне водослива, истечение через плотину неподтопленное. Минимальная глубина в НБ $3,4 \text{ м}$, что соответствует отметке уровня НБ $109,4 \text{ м}$. При этом режиме через водослив проходит расход $3,6 \text{ л/с}$, что соответствует в натурных условиях расходу $54,6 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 1

Пропускная способность плотины Полоцкой ГЭС

Расчетный расход Q , м ³ /с	Отметка НПУ, м	Отметка ФПУ, м	Отметка НБ, м	Перепад уровней в бьефах Δz , м	Максимальные скорости на оси потока V , м/с, на расстоя- нии от водобойного колодца		Характеристика режима сопряже- ния бьефов
					28,0 м	101,0 м	
3%-я обеспеченность 3750	118,0	120,8	120,3	0,5	2,5	1,4	Прыжок затоплен
0,5%-я обеспечен- ность 5000	118,0	122,4	121,8	0,6	3,2	2,5	Прыжок затоплен

Поток, переливающийся через шандорное заграждение, падает на водосливную поверхность плотины и, двигаясь по ней, поступает в водобойный колодец. При глубине колодца 1,0 м гидравлический прыжок в НБ затоплен. На выходе потока из водобойного колодца перепад не образуется, сбойность потока не наблюдается.

Аналогичный режим в НБ наблюдался и при отсутствии водобойного колодца, когда водосливная поверхность сопрягалась с дном нижнего бьефа на отметке 106,0 м. Отгон гидравлического прыжка не наблюдался, он был затоплен.

Максимальные скорости потока в конце рисбермы как при наличии водобойного колодца, так и при его отсутствии не превышали 1,2 м/с. Такие же скорости получены и на расстоянии 101,0 м от водобойного колодца. Эпюры скоростей на оси потока приведены на рис. 4.

Таким образом, для всех исследованных режимов истечения через водосливную плотину, при устройстве в нижнем бьефе водобойного колодца глубиной 1,0 м прыжок был затоплен. Затопление гидравлического прыжка отмечено и при отсутствии водобойного колодца, однако

придонные скорости потока в конце рисбермы в этом случае несколько больше (0,9 против 0,7 м/с при устройстве колодца). В связи с этим, а также учитывая, что исследованы не все возможные схемы открытия затворов, рекомендуется устройство за водосливной плотиной водобойного колодца глубиной 1,0 м.

4. Проверка пропуска льда при переливе потока через шандорное заграждение. Искусственно замороженные льдины размером в плане 20×20 см и толщиной 1,6...1,8 см пропускались через шандорное заграждение высотой 8,52 см (что соответствовало в натурных условиях 4,0 м), при отметке НПУ 116,0 м в верхнем бьефе и минимальной глубине воды в нижнем бьефе (что соответствовало отметке НБ 109,4 м).

Во всех опытах с водобойным колодцем и без него при минимальной глубине воды в НБ льдины, сбрасываемые через шандорное заграждение, ударялись о водосливную поверхность плотины (так как глубина потока на ней небольшая). В зоне гидравлического прыжка, с колодцем и без него, льдины задерживались, под действием водоворотного потока периодически ударялись

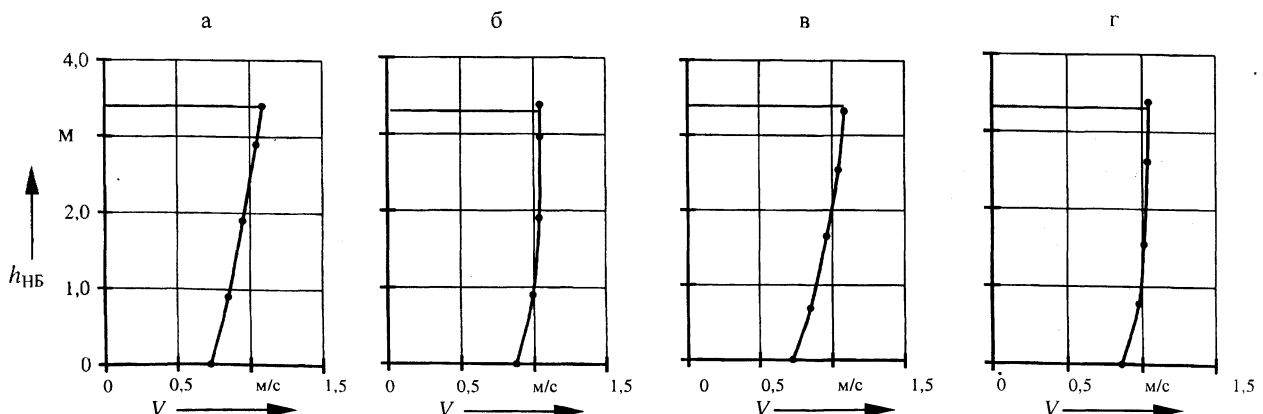


Рис. 4. Эпюры скоростей потока в нижнем бьефе по оси пролета при переливе потока через шандорное заграждение высотой 4,0 м при наличии (а и б) и отсутствии (в и г) водобойного колодца на расстоянии 28,0 м (а, в) и 101,0 м (б, г) от колодца

о водосливную поверхность плотины и поверхность водобойной плиты. Следовательно, такой режим пропуска льда не может быть рекомендован, так как возможно разрушение водосливной поверхности и поверхности водобоя.

Для предотвращения ударов льдин о водосливную поверхность плотины рекомендуется устраивать на шандорном заграждении козырек длиной 1,0...1,5 м с плавным криволинейным очертанием водосливной поверхности. Устройство такого козырька увеличит дальность отлета струи, переливающейся через шандоры, в результате льдины будут падать на поверхность воды в нижнем бьефе, а не на поток на водосливной поверхности плотины.

Во избежание ударов льдин о водосливную поверхность и поверхность плотины водобоя, при их вращательном движении в зоне гидравлического прыжка пропуск льда необходимо начинать при глубине потока в НБ не менее 5,0 м, т. е. при отметке уровня нижнего бьефа 111,0 м и выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
2. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. – Л.: Энергия, 1967. – 210 с.
3. Ляхтер В. М., Прудовский А. М. Гидравлическое моделирование. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Шарп Д. Ж. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984.
5. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И. Гидравлика. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
6. Зегжда А. П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. – М.; Л.: Госстройиздат, 1938. – 164 с.
7. Веников В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. – М.: Высш. шк., 1966.
8. Панфилов Д. Ф. Моделирование давления и пропуска льда / Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1964. – № 7. – С. 115–122.
9. Петруничев Н. Н. О динамическом давлении льда на гидротехническое сооружение: Лёдотермические вопросы в гидроэнергетике. – М.; Л.: Гидрометеоиздат, 1954. – С. 17–64.
10. Пропуск льда через гидротехнические сооружения / Под ред. К. Н. Коржавина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 182 с.

УДК 666.97.033.17

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ–ОТТАИВАНИЯ

Докт. техн. наук ЛЕОНИЧ С. Н.

Белорусский национальный технический университет

Для центрифугированных железобетонных конструкций кольцевого сечения, подвергаемых знакопеременным температурным воздействиям в условиях водонасыщения, характерны существенная неоднородность прочностных, деформативных и теплофизических свойств бетона в радиальном направлении и анизотропия, обусловленные спецификой формования, градиентами температуры и влажности, характером армирования и трещинообразованием. Остаточные деформации, возникающие в результате деструктивного расширения бетона при циклическом замораживании–оттаивании (ЦЗО), вызывают перераспределение напряжений между бетоном и арматурой.

Для анализа напряженно-деформированного состояния инженерных сооружений цилиндрической формы разработаны физические соотношения, учитывающие работу бетона в плоском напряженном состоянии, неоднородность по толщине прочностных, деформативных и теплофизических свойств, анизотропию, усадку и ползучесть бетона. Физические соотношения получены на основании данных для неоднородных анизотропных оболочек и пластин.

Рассмотрен случай ортогонального армирования с трещинами, проходящими нормально к арматурным стержням (рис. 1). Уравнения механического состояния бетона записаны в форме модифицированной теории его пластичности.